

УДК 620.179.14
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ОТ ПРОВОДЯЩИХ
ОТЛОЖЕНИЙ НА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННЫХ
ТРУБ ПРИ КОНТРОЛЕ ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

П. А. БАРАБАНОВ, В. П. ЛУНИН, А. А. СТОЛЯРОВ
ФГБОУ ВПО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»
Москва, Россия

На настоящий момент доля электроэнергии, полученной на атомных электростанциях (АЭС) в России, составляет порядка 16 % от всей производимой электроэнергии. Атомная энергетика играет важную роль в обеспечении энергией потребителей и является одной из приоритетных областей развития энергетического комплекса.

Один из важнейших узлов ядерного реактора – парогенератор (ПГ). Теплообменные трубы ПГ являются границей между первым и вторым контурами атомных электростанций, и, в связи с этим, играют важную роль в их безопасной эксплуатации.

Среди требующих решения проблем, возникающих при проведении вихретокового неразрушающего контроля теплообменных труб (ТОТ), одной из наиболее актуальных остается проблема достоверного обнаружения и определения объема электропроводящих и/или магнитных отложений продуктов коррозии на внешней поверхности ТОТ. Отложения на внешней поверхности ТОТ оказывают негативное влияние на надежность и работоспособность ПГ. Во-первых, под скоплениями отложений образуется благоприятная среда для развития коррозии стенок ТОТ. Также, ввиду нарушений циркуляции теплоносителя, обусловленной скоплениями отложений, увеличиваются вибрационные нагрузки на трубный пучок, что способствует развитию и росту дефектов. В-третьих, наличие отложений является сильным мешающим фактором при контроле дефектов основного металла труб ПГ вихретоковым методом, их обнаружение и отстройка от их влияния на сигнал является одной из важнейших задач повышения качества контроля.

Основной целью представленной работы является анализ влияния проводящих и магнитных отложений на вихретоковый сигнал с целью создания автоматизированного алгоритма обнаружения и оценки объема отложений при проведении плановых работ по проверке состояния ТОТ.

Для решения поставленной задачи необходимо иметь определенный набор сигналов от отложений с различными геометрическими и физическими параметрами. Следовательно, прежде чем решать обратную задачу НК, необходимо получить решение прямой задачи и создать базу сигналов.

Прямая задача вихретокового контроля - получение сигналов от ВТП. Так как провести необходимое количество экспериментов не представляется возможным, было принято решение использовать для получения данных результаты моделирования процесса контроля методом конечных элементов [1, 2, 3]. В пакете *Comsol Multiphysics* была создана двумерная модель процесса контроля, позволившая получить базу модельных сигналов.

С целью анализа влияния геометрических и физических параметров отложений на сигнал, была составлена база данных, содержащая смоделированные сигналы от 1200 отложений с различными свойствами ($h = 2 \div 10$ мм, $w = 0,1 \div 5$ мм) на четырех рабочих частотах (25, 100, 200, 400 кГц). Так как отложения на разных АЭС имеют различные физические свойства, были смоделированы отложения, имеющие различную электрическую проводимость $\sigma = 0,1 \div 0,5$ МСм/м и магнитную проницаемость ($\mu = 1 \div 25$).

В анализируемых сигналах было выделено 23 информативных параметра (13 на дифференциальном канале и 10 на абсолютном), среди них: фаза, амплитуда, максимумы активной и реактивной составляющей, длина годографа, энергия сигнала и другие. Затем был проведен корреляционный анализ значений признаков и интересующих нас параметров с целью выявить степень их влияния на сигнал.

Результаты корреляционного анализа показали, что невозможно выделить какой-либо признак, по которому можно было бы однозначно определить те или иные параметры отложения. В подавляющем большинстве случаев, коэффициенты корреляции не превышают значения 0,6. К тому же, большинство информативных признаков, как правило, в равной степени коррелируют сразу с несколькими параметрами отложений, что сильно усложняет их интерпретацию.

В качестве поиска способа увеличения коэффициентов корреляции между признаками отложений и информативными параметрами сигнала был проведен эксперимент с применением аффинных преобразований, т. е. геометрических преобразований, сохраняющих пропорции фигур, в частности вращений и масштабирования. Некоторые из них, по сути, реализуют стандартные процедуры настройки и калибровки вихревых дефектоскопов (изменение фазы сигналов при калибровке по 100 % дефекту). В результате данных экспериментов стало известно, что простое вращение годографов относительно начала координат (варьирование фазы сигнала) никак не влияет на коррелированность параметров. Однако при исключении с помощью аффинных преобразований фазового (приравнивание фаз всех сигналов к одному значению) или амплитудного критериев (приравнивание всех амплитуд к одному значению) позволяют увеличить коэффициенты корреляции до значений 0,7–0,8, а, в отдельных случаях, даже до

0,9. К тому же, при такой отстройке появляются признаки коррелирующие только с одним параметром отложения, что потенциально существенно упрощает интерпретацию сигналов.

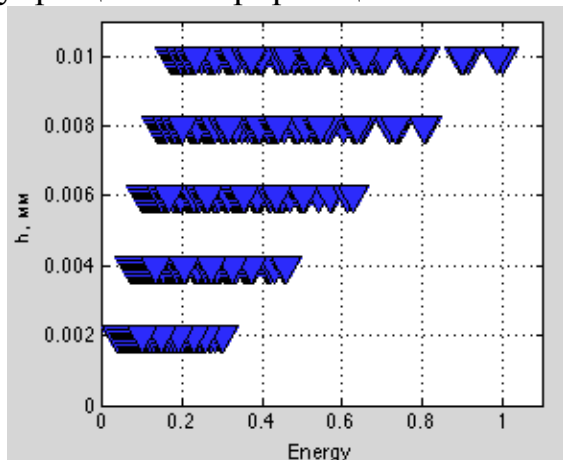


Рис. 1. Зависимость энергии сигнала от протяженности отложения до применения аффинных преобразований (абсолютный канал, $f = 200$ кГц)

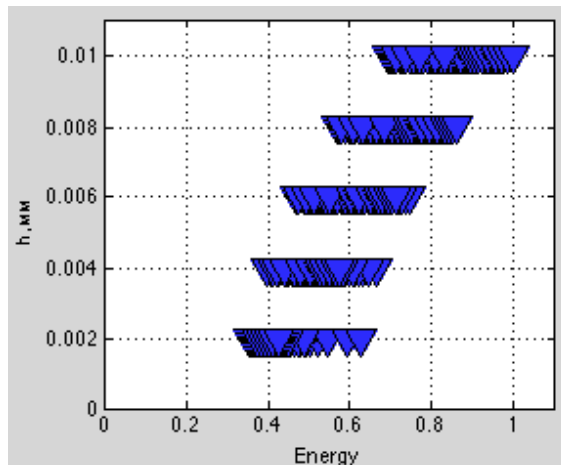


Рис. 2. Зависимость энергии сигнала от протяженности отложения после применения аффинных преобразований (абсолютный канал, $f = 200$ кГц)

На данном этапе можно однозначно сказать, что дифференциальный сигнал имеет несколько большую чувствительность к физическим свойствам отложений, в то время как абсолютный сигнал более чувствителен к геометрическим параметрам. Тем не менее, несмотря на улучшение коррелированности признаков сигналов и свойств отложений, говорить о применении простых линейных алгоритмов для интерпретации сигналов (построении калибровочных кривых) нельзя. Поэтому целью дальнейшей работы является более глубокое изучение полученных зависимостей, поиск новых информативных параметров, а также изучение возможности применения тех или иных методов цифровой обработки сигналов для решения поставленной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов В. Г. Неразрушающий контроль : в 5 кн. Электромагнитный контроль : практ. пособие / В. Г. Герасимов, А. Д. Покровский, В. В. Сухоруков // М. : Высш. шк., 1992. – Кн. 3.
2. Лунин, В. П. Метод конечных элементов в задачах прикладной электротехники / В. П. Лунин. – М. : Изд-во МЭИ, 1996.
3. Jiang Z., El Guedri M., Haddar H., Lechleiter A. Eddy current tomography of deposits in steam generator. // 19th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2011), Barcelona, Spain, 2011

E-mail: barabanov.pa@gmail.com